



TITLE:

# 超精密加工機の動特性の解析と評価に関する研究( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

甲斐, 義章

---

CITATION:

甲斐, 義章. 超精密加工機の動特性の解析と評価に関する研究. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19375>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	甲 斐 義 章
論文題目	超精密加工機の動特性の解析と評価に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、光学部品加工に用いられる超精密加工機を対象として、工具や工作物の運動を支持する案内の動剛性と抵抗力ならびに支持方式が加工機の振動に与える影響を解析した結果について述べており、全6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、光学部品を加工対象としてきた超精密加工機の発展の経緯や、近年は加工における要求精度レベルが高まるだけでなく、光学部品の大型化・複雑化にともなう軸運動の高速化・高応答化が求められていることが述べられている。従来の超精密加工機の設計仕様にはなかった要求により、加工機の構造振動や運動部の摩擦の問題が大きくなっていることを指摘し、本研究の目的が、運動案内機構と機械構造の動的な解析により超精密加工機の高速・高精度化に対する指針を与えることであると定義している。</p> <p>第2章では、超精密加工で用いられる切削・研削プロセスについて詳述し、それぞれのプロセスへの要求仕様を幾何精度、仕上げあらさ、加工スピードで分類している。たとえば、超精密切削加工の要求加工精度は仕上げ面あらさで1nmRa、形状精度で0.1μmP-Vに達しており、送り速度も1m/minが要求されている。具体的な加工例としてマイクロレンズ金型、ナノインプリント金型などの加工事例から機械に要求される軸構成と加工運動について説明している。また、これらの要求に対して、超精密加工機の主要要素である主軸、案内機構、駆動機構、除振装置の設計指針と具体的に使用される機械要素の関係をまとめている。特に案内機構については、従来から超精密加工機で採用されてきた油静圧案内・空気静圧案内とは異なり、有限軌道の転がり案内機構とリニアモータ駆動との組み合わせを採用することで、1nm（ナノメートル）のステップ送りが実現できることを実機測定で示している。</p> <p>第3章では、超精密加工機の案内機構について概観し、静圧案内と比べて姿勢安定性に優れる転がり案内機構の剛性を解析している。転がり案内は、近年特に真直度特性が向上しており、その代表は、転動体に小さな直径の球を多数個軌道面に配置して無限循環させる転がり案内、ならびに超精密加工されたローラをきさげ・ラップ加工された案内面に配置して移動体を支持する有限軌道転がり案内である。無限軌道転がり案内と有限軌道転がり案内の動剛性を比較するため、可搬能力がほぼ等しい2種類のテストスタンドに対して振動特性の比較を行っている。実験から振動モードは移動体の回転振動モードが支配的であり、固有振動数は有限軌道転がり案内の方が高いことを示している。回転振動モードを簡易モデルと有限要素法で解析し、案内機構の並進方向の等価剛性を実験値から同定し、有限軌道転がり案内の等価剛性が高いことを示し、その理由を案内の転動体の負荷分布によるものであると考察している。</p> <p>第4章では、有限軌道転がり案内の摩擦を含む抵抗力を微小ステップと反転をとまなう運動実験を用いて無限軌道転がり案内の抵抗力と比較して解析している。実験において、無限軌道転がり案内の抵抗力が、ステップ運動開始時に増加、運動停止後に減少した後、往復の運動の平均値に近づくのに対して、無限軌道転がり案内の抵抗は停止後も</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	甲 斐 義 章
<p>偏差成分を維持することを示した。すなわち、無限軌道転がり案内の抵抗は、転動体と軌道の接触面のすべり抵抗だけでなく弾性変形による抵抗成分も含むが、有限軌道転がり案内の抵抗力は、すべりによる成分だけを持つことを明らかにした。また、実験により、速度ならびに潤滑剤の粘度のすべり抵抗成分に対する影響を明らかにしている。さらに、有限軌道転がり案内では、無限軌道転がり案内で観察される運動反転時のオーバーシュートがないことを実験で示し、その理由を、有限軌道転がり案内の転動体に加わる荷重が非常に小さく荷重接触面が多いためと考察している。</p> <p>第5章では、機械設置床からの振動の影響を排除するため備えられた除振装置について3点支持と4点支持の場合の振動特性を実験と有限要素モデルで比較し、超精密加工機に最適な支持方法を検討している。実験において、支持点の違いによる床から機械への振動伝達率を測定し、低周波領域での除振特性を解析している。特に除振性能が要求される周波数（10Hz）付近で4点支持の方が振動伝達率は低いことを示した。また加工機への打撃試験を行って構造体の周波数応答関数を測定し、有限要素法でモードを検証して、構造全体の振動にはロッキング振動モードの影響が大きいため、3点支持と比較して4点支持の振動応答が低いことを示した。通常、支持点が増えることで加工機内の運動要素からの外乱（直動外乱）による振動は低減するが、逆に床からの振動伝達率が大きくなるといわれている。しかし、実際の機械においては鉛直方向の並進振動よりもロッキング振動が振動伝達に与える影響も大きく、4点支持の方が直動外乱応答のみならず床からの振動伝達率も低いことを明らかにした。</p> <p>第6章では、本論文で得られた結論を述べている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、光学部品加工に用いられる超精密加工機を対象として、直線運動を支持する案内の動剛性と抵抗力を評価し、支持方式が加工機の振動に与える影響を解析した結果についてまとめており、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 近年、特に真直度特性が向上した転がり案内機構について、転動体に小さな玉径の球を多数個軌道面に配置して無限循環させる転がり案内と超精密加工されたローラをきさげ・ラップ加工された案内面に配置して移動体を支持する有限軌道転がり案内の剛性を解析した。可搬能力がほぼ等しい2種類のテストスタンドに対して振動特性の比較実験を行った結果、振動モードは移動体の回転振動モードが支配的であり、固有振動数は有限軌道転がり案内の方が高いことを示した。回転振動モードを簡易モデルと有限要素法で解析し、案内機構の並進方向の等価剛性を実験値から同定し、有限軌道転がり案内の等価剛性が高いことを示した。

2. 有限軌道転がり案内の摩擦を含む抵抗力を微小ステップと反転をともなう運動において実験で解析した。無限軌道転がり案内の抵抗は、転動体と軌道の接触面のすべり抵抗だけでなく弾性変形による抵抗成分も含むのに対して、有限軌道転がり案内の抵抗力は、すべりによる成分だけを持つことを明らかにした。この理由を有限軌道転がり案内の転動体に加わる接触面圧が低く、接触点が分散しているためと考察した。

3. 機械設置床からの振動の影響を排除するため備えられた除振装置について3点支持と4点支持の場合の振動特性を比較し、超精密加工機に最適な支持方法を検討している。通常、支持点が増えることで加工機内の運動要素からの外乱による振動は低減するが、逆に床からの振動伝達率が大きくなる。しかし、実際の機械においては鉛直方向の並進振動よりもロッキング振動が振動伝達に与える影響も大きいため、4点支持の方が、直動外乱応答のみならず床からの振動伝達率も低いことを明らかにした。

以上、本論文は超精密加工機の動的な特性を実験・理論解析で明らかにし、超精密加工機の高速度・高精度化設計に必要な知見を示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年10月28日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。